干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

塔里木河下游水生态安全评价及驱动要素分析

李梦怡[1,2]， 邓铭江[3]， 凌红波[4]， 王光焰[5]， 徐生武[5]

（1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津 300350； 2. 天津大学建筑工程学院，天津 300350； 3. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局，新疆 乌鲁木齐 830000； 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011； 5. 新疆塔里木河流域干流管理局，新疆 库尔勒 841000）

摘 要：随着塔里木河流域水资源统一管理不断加强，塔里木河下游生态输水量增加，生态保护取得了阶段性成效。然而，水资源严格管理下的塔里木河下游水生态安全状况及变化过程如何，相关研究缺乏科学的评估。对此，本文利用塔里木河下游2000—2017年的水量、监测断面地下水埋深、胡杨新增生物量、植被覆盖度、干旱指数等指标数据，运用主成分分析法和综合指数法评价了其水生态安全状况，揭示了影响水生态安全的驱动要素及其变化特点。结果表明：2000—2017年，塔里木河下游的水生态安全综合评价指数由3.91上升到8.47，生态安全水平不断提高，经历了从中度警示区到较安全区的变化过程。影响水生态安全评价的主要要素是水文驱动要素和植被驱动要素，其中下泄水量、地下水埋深和植被多样性对下游水生态安全影响显著。以上研究为优化塔里木河下游生态输水模式提供重要的科学依据。

关键词：塔里木河； 下游生态安全评价； 主成分分析法； 驱动要素

塔里木河是我国最长的内陆河，从最长的源流叶尔羌河算起，全长2486 km，是中国乃至世界范围内生态系统最为脆弱的区域之一[1]。但随着上世纪50年代水土资源的大规模开发，塔里木河干流来水量急剧减少，地下水位下降，大量植被衰败，生态遭到严重破坏。为维护塔里木河的生态安全，拯救濒临毁灭的下游“绿色走廊”[2-3]，自2000年起，塔里木河流域管理局组织实施了下游生态输水；为进一步提升综合治理效果，2010年塔里木河流域实施水资源统一管理，截至2017年底塔里木河下游的生态环境已得到初步改善。为定量阐述下游生态环境的恢复程度，张建生等[4]对治理前后塔里木河下游沙漠化土地的时空变化趋势进行了定性定量分析；徐海量等[5]对输水前后地下水的时空变化和天然植被对地下水动态变化的响应差异展开了针对性的分析；朱长明等[6]和黄粤[7]等分别以最大和平均植被覆盖度与植被类型、覆盖面积为指标，探讨了塔里木河下游植被在生态输水条件下的恢复情况；龚君君等[8]通过研究塔里木河下游的胡杨主干径向生长量变化规律，探究生态输水效应。为进一步评估下游生态治理工程进行综合效益，蒋良群等[9]运用模糊综合评判的方法进行塔里木河下游植被生态风险的遥感定量评估。叶朝霞等[10]通过对地下水位动态变化进行横向和纵向比较，评价生态输水综合效益；邓铭江[11]对生态输水后植被指数变化进行了系统研究分析，并提出植被相对恢复度的评价方法。这些研究从植被遥感、地下水监测、胡杨生理长势等角度阐述和论证了生态输水的环境效益，具有重要的科学意义。上述研究主要以单个指标评估塔里木河下游生态状况，缺乏利用多指标对塔里木河下游开展系统而全面地评估。本文基于遥感数据与观测资料，构建了塔里木河下游水生态多指标评价体系，阐明了近20 a来塔里木河下游水生态的变化特点与驱动过程，以客观反映下游生态状况，为干旱区内陆河流域生态变化的驱动因素研究提供典型案例，同时能为塔里木河流域水资源的管理和配置提供决策参考。

收稿日期：2020-05-03； **修订日期：**2020-07-21
基金项目：中国科学院“西部青年学者”项目（2019-XBQNXZ-A-001）；新疆天山青年计划（2019Q006）；中国科学院科技服务网络计划（STS计划）项目（KFJ-STS-QYZD-114）资助
作者简介：李梦怡（1993-），女，硕士研究生，主要研究方向为生态水文过程. E-mail: 1724657017@qq. com
通讯作者：凌红波. E-mail: linghongbo0929@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木河下游位于新疆尉犁县和若羌县境内，是从大西海子水库至台特玛湖的区间河段，总长约320 km，该河段夹峙于塔克拉玛干沙漠和库鲁克塔格沙漠之间，地理位置86°37′~88°30′E，39°24′~41°40′N（图1）。研究区地处罗布泊微弱拗陷区，构造稳定，第四纪沉积物厚约350 m，沉积物以粘土质的河、湖相沉积为主；地形平坦，微向东倾斜，坡度3‰左右。研究区降雨量为17.4~42.0 mm，蒸发量高达2500~3000 mm，属大陆性暖温带极端干旱气候区，抗逆性差，生态环境极为敏感和脆弱[12]。由于恶劣的环境条件，植被主要沿河呈带状分布，植被类型自上而下总体呈由高覆盖度的胡杨林、柽柳灌丛、盐生草带向中低覆盖度的胡杨林、柽柳灌丛向低盖度的稀疏柽柳灌丛带过渡的特征[13-14]。

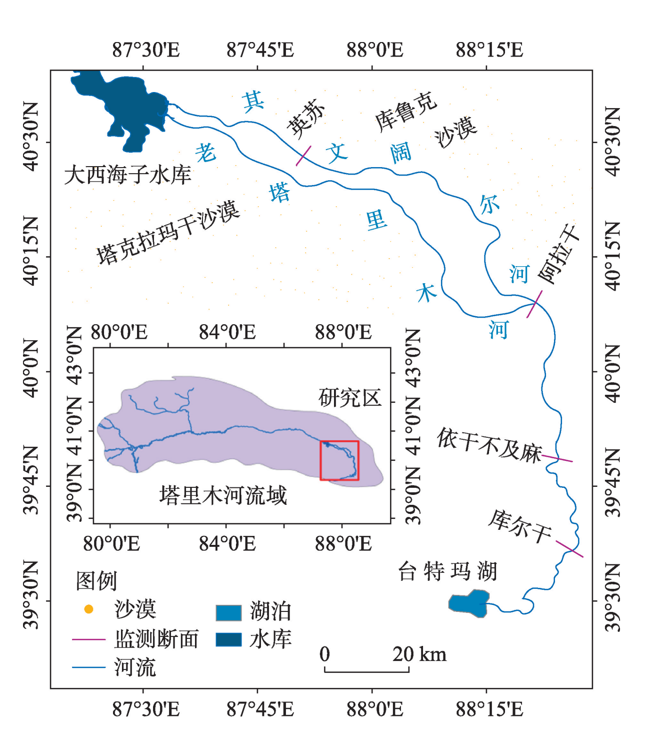


图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

本文采用的数据包括：(1) 2000—2017年大西海子水库共18次下泄水量数据与下游英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻4个典型监测断面上地下水埋深数据，该数据从塔里木河干流管理局获取。(2) 2000—2017年归一化植被指数(NDVI)和干旱指数(TVDI)的遥感数据来源于美国NASA发布的2000—2017年MODIS MOD13Q1和MOD11A2数据集。(3) 在塔里木河下游4个典型断面上设置一条监测样带，每一条监测样带在离河道50 m、150 m、300 m、500 m、750 m、1050 m处的监测井附近分别设置25 m×25 m的样方，获取2000—2017年每种植被的种类、个体数、盖度、高度、冠幅和频度等数据。(4) 在4个典型断面上布设100 m×100 m样方，获取2000—2017年样方内胡杨胸径、树高、冠幅、长势等数据。(5) 2000—2017年铁干里克气象数据来源于铁干里克气象局。

1.3 研究方法

1.3.1 生态安全评价指标体系的建立 建立合理的生态评价指标体系是研究地区生态安全水平的关键，本文以科学性、简明性、系统性为基本原则[15]，结合数据的可收集性和分析过程的可操作性，遴选出水文、土壤和植被3类要素，共7个评价指标构建了塔里木河下游水生态安全评价指标体系[15-17]，如图2所示。

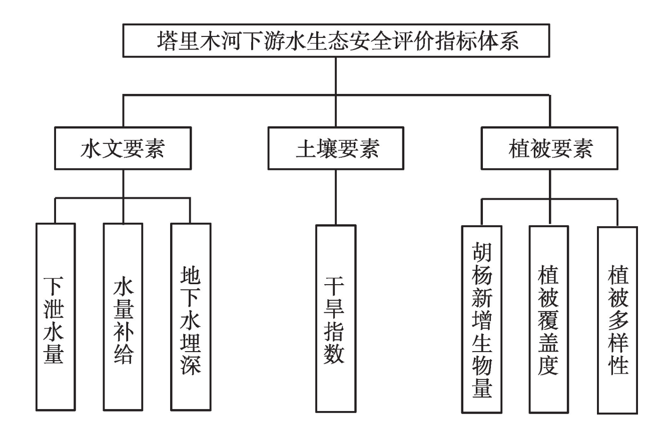


图2 塔里木河下游生态水安全评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of ecological water safety in the lower Tarim River

生态输水是保证下游水生态安全的根本途径；水量补给包括下泄水量对地下水与包气带的补给，用于抬升地下水位和增加土壤含水率；生态输水后地下水位的恢复是下游生态系统恢复的关键。土壤水分是植被生长最主要的水分来源，干旱指数作为反映土壤含水率的重要参数，是衡量植被生境条件优良与否的重要指标。胡杨新增生物量、植被覆盖度与植被多样性是定量衡量地表植被恢复状况

的重要指标。

塔里木河下游生态水安全评价指标体系中，X_1为下泄水量(10^8 m^3)、X_2为水量补给(10^8 m^3)、X_3为地下水埋深(m)、X_4为干旱指数、X_5为胡杨新增生物量(kg·hm^{-2})、X_6为植被覆盖度、X_7为植被多样性。

1.3.2 评价指标体系的计算 干旱指数(TVDI)反映土壤在不同干旱条件下植被的分布特征，计算方法如公式(1)。

$$\mathrm{TVDI}=\frac{T_s-T_{s\min}}{T_{s\max}-T_{s\min}} \tag{1}$$

式中：TVDI值介于0~1之间，TVDI越接近0，表明土壤水分越接近田间持水量，越接近1，表明土壤水分含量越接近萎蔫点。T_s表示陆面温度(℃)；$T_{s\min}$表示陆面温度极低值(℃)；$T_{s\max}$表示陆面温度极高值(℃)。

植被多样性利用Shannon-Wiener指数表征，如公式(2)。

$$D=-\sum_{i=1}^{S}\left(P_i\ln P_i\right) \tag{2}$$

式中：D为多样性指数；S表示样方内的物种数，P_i表示第i个物种出现的频率，即$P_i=N_i/N$，N为样方中全部种的个体数；N_i表示样方中第i个种的个体数。

植被覆盖度(V_c)与归一化植被指数(NDVI)之间极显著线性相关，植被覆盖度(V_c)可利用归一化植被指数(NDVI)求解，如公式(3)所示。

$$V_c=\frac{\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI}_s}{\mathrm{NDVI}_v-\mathrm{NDVI}_s} \tag{3}$$

式中：V_c为植被覆盖度，NDVI_s为研究区裸地NDVI值，NDVI_v为纯植被象元NDVI值。NDVI_s和NDVI_v分别取年NDVI直方图的5%处和95%处的值。

1.3.3 遥感影像数据处理 采用ENVI 5.0对2000—2017年MODIS-EVI和MODIS-LST数据集进行数据提取、辐射校正、几何纠正和投影变换等处理，得到塔里木河下游2000—2017年干旱指数(TVDI)的逐年均值数据；对MODIS-NDVI数据集进行格式和投影转换、裁剪、Savitzky-Golay滤波和MVC合成处理，获得塔里木河下游2000—2017年NDVI数据。

1.3.4 评价指标级别划分标准的确定与评价计算 本文参考塔里木河和黑河流域等典型干旱区河流的生态安全评价体系[17-22]，结合下游生态环境，确定评价指标的分级依据：(1) 下泄水量和水量补给根据地下水位的抬升程度和植被恢复情况分级。(2) 地下水埋深分级根据下游各类植被适宜生长的地下水位；植被覆盖度和植被多样性指标分级依据植被生长状况。(3) 指标分级根据实际情况，综合专家的意见确定。将塔里木河下游水生态安全水平划分为5个级别(I~V)并赋以相应分值(2分~10分)，如表1所示。

水生态安全综合评价指数K的计算依据综合指数法[20]，如公式(4)。

$$K=\sum_{i=1}^{7}r_j\times C_j \tag{4}$$

式中：r_j和C_j分别为第j项指标的权重和对应指标所赋分值。根据生态安全水平的判别标准，把K从低到高划为5个等级[21]，分别为：重度警示区(0分≤K<3分)，中度警示区(3分≤K<5分)，预警区(5分≤K<7分)，较安全区(7分≤K<9分)，安全区(9分≤K<10分)。

2 结果与分析

2.1 评价指标权重确定

在塔里木河下游，对选取的水生态安全评价指标(表1)进行主成分分析，结果表明前三个主成分

表1 评价指标的级别划分

Tab. 1 Grade division of evaluation index

评价指标	指标级别划分标准与指标赋值				
	I(10分)	II(8分)	III(6分)	IV(4分)	V(2分)
下泄水量(X_1)	>6	4.5~6	3.5~4.5	2~3.5	<2
水量补给(X_2)	>5.7	3.8~5.7	3~3.8	1.6~3	<1.6
地下水埋深(X_3)	2~4	4~4.5	4.5~5	5~6	>6
植被覆盖度(X_4)	>0.2	0.15~0.2	0.1~0.15	0.05~0.1	<0.05
胡杨新增生物量(X_5)	>50	35~50	30~35	20~30	<20
植被多样性(X_6)	>1.5	1~1.5	0.5~1	0.3~0.5	<0.3
干旱指数(X_7)	<0.46	0.46~0.57	0.57~0.76	0.76~0.86	> 0.86

累计贡献率达到91.39%(表2),因此评价指标选取较为全面合理。根据评价指标对主成分的信息反映程度表明(表3),第一主成分与表1中的X_1、X_2、X_3、X_4、X_5和X_6存在较强的正相关关系,与X_7负相关,表明水文、植被是影响下游水生态安全的关键要素。第二、三主成分与X_7有较强的正相关,主要体现出气象要素对该区域水生态安全也产生了一定的影响。在主成分分析的基础上,本文进一步计算得到了塔里木河下游水生态安全评价指标的综合得分和权重(表4)。

表2 指标特征值与方差贡献率

Tab. 2 Index eigenvalue and variance contribution rate

成分	特征值	成分贡献率/%	累计贡献率/%
1	4.22	60.29	60.29
2	1.45	20.69	80.99
3	0.73	10.40	91.39

表3 主成分载荷矩阵

Tab. 3 Principal component load matrix

	主成分1	主成分2	主成分3
X_1	0.83	0.48	−0.24
X_2	0.85	0.17	−0.11
X_3	0.81	0.51	−0.26
X_4	0.83	−0.31	0.36
X_5	0.89	−0.38	0.05
X_6	0.82	0.51	−0.26
X_7	−0.12	0.77	0.62

从表4可看出,塔里木河下游水生态安全影响指标重要性排序为:下泄水量(X_1)>水量补给(X_2)>地下水埋深(X_3)>植被覆盖度(X_4)>胡杨新增生物量(X_5)>植被多样性(X_6)>干旱指数(X_7)。水文要素指标(X_1~X_3)权重和为0.51,植被要素指标(X_4~X_6)权重为0.39,水文和植被要素是影响塔里木河下游水生态安全的主要驱动因子。

2.2 塔里木河下游水生态安全结果评价

结合水生态安全评价指标的权重及指标评分,对2000—2017年塔里木河下游水生态安全进行评价(图3)。由图3可知,水生态安全综合评价指数波动上升,安全水平经历从“中度警示区-预警区-较安全区”的变化过程。2000—2003年生态安全综合评价指数逐年上涨,由3.98增至6.40,安全等级由中度警示区提升到预警区,表明生态输水后下游水生态安全水平得到明显的提高。在2004—2008年间水生态安全综合评价指数变化趋势以下降为主,安全等级降为中度预警区。从2009年起至2017年,水生态安全综合评价指数增速明显且基本呈逐年增长的趋势,由3.98(2000年)增长至8.47(2017年)。2009—2010年和2015—2016年,水生态安全水平分别经历了从“中度警示区-预警区”和“预警区-较安全区”的转变,以上表明实行流域水资源统一管理之后,下游水生态安全水平得到显著提高。

2.3 塔里木河下游水生态安全变化的驱动要素分析

在塔里木河下游,水是绿洲、荒漠系统存在和发展中最关键的因素,它维系着脆弱生态系统的结构完整和动态平衡。从图4a可以看出,水生态安全评价结果与下泄水量进行同步变化:对于塔里木河下游下泄水量,2000—2003年逐年增长,在2003年达到6.20×10^8 m^3;2004年下泄水量明显下降,较2003年下降了83.03%。2007—2009年下泄水量仅为0.5×10^8 m^3,至2010年下泄水量在近6 a达到3.90×10^8 m^3的最大值,由此导致下游水生态安全水平在2010年前后呈先降后升的变化特征(图3)。除2014年,2011—2017年间下泄水量以每年7.09%的增长率变化,除2014年下泄水量仅0.07×10^8 m^3,其余年均在3.5×10^8 m^3以上;2017年下泄水量处于历

表4 水生态安全评价指标综合得分与权重

Tab. 4 Comprehensive score and weight of water ecological safety evaluation index

	主成分1	主成分2	主成分3	综合得分F	排名	权重r_j
X_1	0.40	0.40	−0.28	0.32	1	0.18
X_2	0.39	0.42	−0.30	0.32	2	0.17
X_3	0.41	0.14	−0.12	0.29	3	0.16
X_4	0.41	−0.25	0.42	0.26	4	0.14
X_5	0.40	−0.26	0.32	0.24	5	0.13
X_6	0.43	−0.31	0.06	0.22	6	0.12
X_7	−0.06	0.64	0.73	0.19	7	0.10

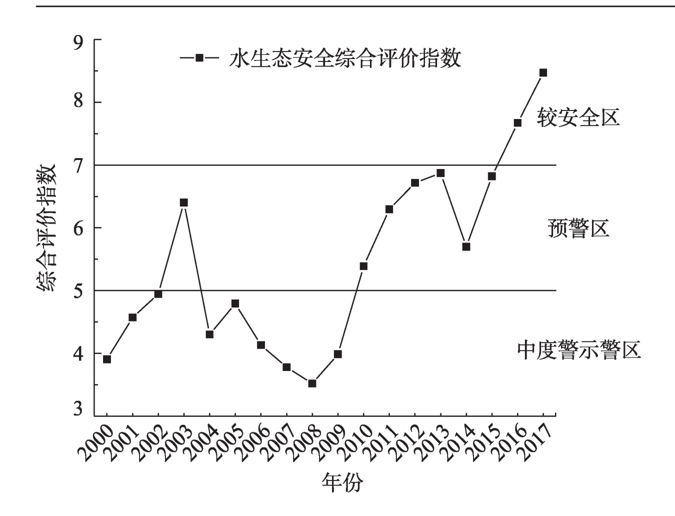


图3 2000—2017年塔里木河下游水生态安全综合评价结果

Fig. 3 Comprehensive assessment results of water ecological security in the lower Tarim River from 2000 to 2017

史高位，为12.15×10^8 m^3，表现为水生态安全水平持续增长，在2014年出现回落。水量补给的变化规律与下泄水量一致。生态输水以来塔里木河下游地下水埋深总体上呈现抬升趋势，从5.79 m（2000年）抬升到3.74 m（2017年），变化幅度为36.75%；时间过程上地下埋深的变化呈现波动性和不稳定性：2000—2004年塔里木河下游累计输水总量17.65×10^8 m^3，年均地下水位由2000年的5.79 m上升到2004年的5.23 m，2006—2009年塔里木河地下水位呈现明显下降趋势，2009年地下水仍未得到及时有效地补给，埋深达到多年来最低值7.40 m。2010年起地下水埋深抬升幅度显著增大。2017年地下水埋深较2010年抬升了54.88%，2011年起地下水埋深稳定在2~6 m，基本能够满足主要建群植被恢复的要求。荒漠河岸植被对于维系干旱区生态系统稳定、防治沙漠化具有重要意义。由图4b可知，2000—2017年胡杨新增生物量整体由16.6 kg·hm^-2增至54.3 kg·hm^-2；胡杨新增生物量除2007—2009年因生态供水不足而略微缩减外，其余年份稳步增长；2000—2017年胡杨新增生物量的增长量为37.7 kg·hm^-2，较2000年增长2.27倍。植被覆盖度从2000年起逐年递增，2008—2010年植被覆盖度下降，并在2010年达到最低拐点0.053，2011年区域植被覆盖度迅速回升至0.082，之后基本呈持续回升的趋势。植物多样性呈现持续增长趋势，在2009—2012年间快速增长，其他年份增速较缓。2003年水生态安全水平升为预警区，主要由于2000—2003年不间断生态输水，地下水位和植被得到一定恢复；2004年植被恢复情况良好，但下泄水量和水量补给比上一年减小近80%，水生态安全水平降为中度警示区。下游水生态安全在2008年降至多年最低水平，是2008年暂停生态输水，植被覆盖度和胡杨新增生物量减小所致。2014年水生态安全水平出现轻微回落，这是因为下泄水量急剧减小，但地下水埋深和植被要素的变化削弱了下泄水量对水生态安全的影响。

3 讨 论

3.1 评价方法合理性

目前针对塔里木河下游生态系统水生态安全评价的研究相对较少，而对某区域生态安全评价的相关研究较多[22-23]。国内区域生态安全评价的主要

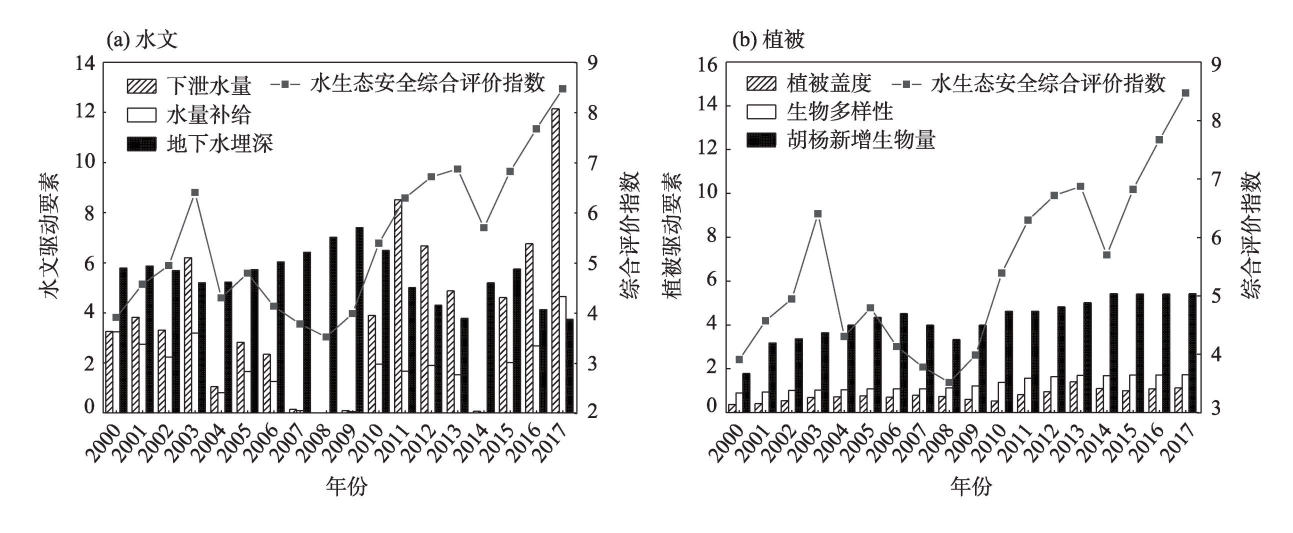


图4 2000—2017年水文和植被驱动要素变化过程

Fig. 4 Change process of hydrological and vegetation driving factors from 2000 to 2017

研究模式为:建立评价指标体系,确定权重,进行综合评价[24-26]。对塔里木河下游生态环境脆弱、水量补给来自源流、植被的生存主要依赖于地下水的典型干旱区来说,建立适宜的评价指标体系是研究的关键环节。目前来看,国内外对干旱区生态安全评价指标体系有基于生态健康的生态风险评价体系、状态-压力-响应指标评价体系、基于生态安全内涵的评价体系等[27-30]。本文在对塔里木河下游生态环境整体把握的基础上,参考了干旱区生态安全评价的相关成果,建立的指标体系涵盖研究区主要生态要素,可表征塔里木河下游水生态安全的状况[31]。研究所需的数据可借助野外调研和GIS获取,具有可操作性。目前,区域生态安全的定量化评价和指标权重的确定方法很多,常见的研究方法有灰色关联度法、景观生态法、层次分析法、模糊评价法和综合指数法等[32-34]。塔里木河下游生态系统退化严重,影响水生态安全的因素相互关联,多重耦合。主成分分析法运用"降维"的基本思想,将多个原始变量转化为几个互不相关的主成分。主成分分析法具有客观性强,能够反映原始变量的绝大部分信息的优点[35],是目前逐渐受到公认的方法。

3.2 评价体系的局限性

从系统的角度来看,塔里木河下游生态系统在自然环境和人为干扰等多重因素的作用下不断发生变化,对其进行水生态安全评价仅能代表某一特定时刻的基本状态。因此该评价体系缺乏对塔里木河下游水生态安全的动态性评估,并且对水生态安全的演变机理缺乏说明。从方法选取的角度来看,塔里木河下游水生态安全评价的结果依赖于评价方法的选取与指标体系的构建,本文缺少塔里木河下游社会要素指标的选取,存在一定不足。虽然塔里木河下游地区人口仅占整个流域的2.25%,受人为干扰较小,但是依然会对水生态安全评价的结果产生影响,需要加强社会要素方面资料的收集。从结果验证的角度来看,水生态安全是一个涵盖多方面因素的复杂问题,且不同地域和尺度的解释也不一致,因此验证评价结果存在很大难度。将评价结果与已有研究成果[36]对比分析,表明塔里木河下游水生态安全评价结果仍具有较高的可靠性,在实际的工作中仍具有重要意义,对塔里木河的流域管理乃至干旱半干旱区的管理和安全评价具有十分重要的借鉴价值。

4 结 论

(1) 塔里木河下游水生态安全评价指数在2000—2017年间增长显著,表明流域水资源管理制度的实施是保障下游生态水安全的关键。下泄水量、地下水埋深和生物多样性是影响下游水生态安全的主要因素。

(2) 持续的生态输水量不仅能够提高下游水生态安全水平,还可以将地下水埋深维持在相对稳定的范围(4~6 m)。尽管如此,2000—2017年间的地下水埋深仍并未达到胡杨、柽柳适宜的地下水埋深(2~4 m),其中2000—2010年塔里木河下游的地下水埋深在6 m左右,塔里木河下游植被处于严重的干旱胁迫状态。为保障塔里木河下游水生态安全,在保证持续输水的同时采取多种输水方式相结合的生态水调度措施。每年4—5月为多数草本植物的萌芽期,进行线性输水疏通河道;每年8—9月为建群植被的萌蘖期,采取汊河和面状输水方式,扩大植被受水面积[2],增大包气带补给量。

(3) 满足$3.5\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$的下泄水量是提升下游水生态安全水平的基本要求。2000—2009年间塔里木河下游水生态安全处于不稳定状态,主要由于下游在2000—2003年间基本保证下泄要求,自2004年起,下泄水量急剧减小,年下泄水量小于$3.5\times10^8\ m^3$,2007年和2009年的下泄水量仅有$0.1\times10^8\ m^3$。2010—2017年塔里木河下游水生态安全水平持续(除2014年)提高,下泄水量除2014年均满足要求。

参考文献(References):

[1] 徐海量, 宋郁东, 陈亚宁. 生态输水后塔里木河下游地下水的动态变化[J]. 中国环境科学, 2003, 23(3): 327-331. [Xu Hailiang, Song Yudong, Chen Yaning. Dynamic change of groundwater after ecological water transport at the lower reaches of Tarim River[J]. China Environmental Science, 2003, 23(3): 327-331.]

[2] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(8): 864-876. [Deng Mingjiang, Zhou Haiying, Xu Hailiang, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2016, 46(8): 864-876.]

[3] 努热曼古丽·图尔荪, 玉米提·哈力克, 塔吉古丽·艾麦提. 生态输水对塔里木河下游地下水变化的影响分析[J]. 宁夏农林科技, 2014, 55(7): 58-60, 2. [Nugemangully Tulsun, Maize T Halik,

Takigul Amy. An analysis on effects of ecological water transportation on groundwater changes of lower reaches of Tarim River[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2014, 55(7): 58-60, 2.]

[4] 张建生, 闫正龙, 王晓国, 等. 塔里木河下游沙漠化土地时空变化遥感分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 161-165. [Zhang Jiansheng, Yan Zhenglong, Wang Xiaoguo, et al. Remote sensing analysis of spatial-temporal changes of desertification land in lower reaches of Tarim River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 161-165.]

[5] 徐海量, 叶茂, 李吉玫. 塔里木河下游输水后地下水动态变化及天然植被的生态响应[J]. 自然科学进展, 2007, 17(4): 460-470. [Xu Hailiang, Ye Mao, Li Jimei. Variation of ground water and vegetation restoration after ecological water transport in the lower reaches of Tarim River[J]. Natural Science Progress, 2007, 17(4): 460-470.]

[6] 朱长明, 李均力, 沈占锋, 等. 基于MODIS密集时间序列数据的塔里木河下游植被活动过程监测[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 591-600. [Zhu Changming, Li Junli, Shen Zhanfeng, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation activities in the lower reach of the Tarim River based on MODIS intensive time series data[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 591-600.]

[7] 黄粤, 包安明, 王士飞, 等. 间歇性输水影响下的2001—2011年塔里木河下游生态环境变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1251-1262. [Huang Yue, Bao Anming, Wang Shifei, et al. Ecological environment changes in the lower reaches of the Tarim River from 2001 to 2011 under the influence of intermittent water transport [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 68(9): 1251-1262.]

[8] 龚君君, 叶茂, 禹朴家, 等. 生态输水对塔里木河下游胡杨主干径向生长量影响研究——以依干不及麻断面为例[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(2): 162-166. [Gong Junjun, Ye Mao, Yu Pujia, et al. Influence of ecological irrigation on the trunk growth of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim Rive: A case of Yiganbujima section[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(2): 162-166.]

[9] 蒋良群, 舒成强, 陈曦, 等. 塔里木河流域下游植被生态风险遥感定量评估[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 556-561. [Jiang Liangqun, Shu Chengqiang, Chen Xi, et al. Quantitative assessment on ecological risk of riparian vegetation in arid areas[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(4): 556-561.]

[10] 叶朝霞, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游生态输水对地下水位影响的综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 12-16. [Ye Zhaoxia, Chen Yaning, Li Weihong. The general appraisement of groundwater level after ecological water transportation in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(8): 12-16.]

[11] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 380-386. [Deng Mingjiang. An appraisal of remote-sensing monitoring on vegetation restoration and ecological water-conveying in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 380-386.]

[12] 徐海量, 陈亚宁, 杨戈. 塔里木河下游生态输水对植被和地下水位的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 18-22. [Xu Hailiang, Chen Yaning, Yang Ge. Effect of translating water on vegetation at the lower reaches of Tarim River[J]. Environmental Science, 2003, 24 (4): 18-22.]

[13] 汪亮亮, 叶茂, 高生峰, 等. 水热因子对塔里木河下游胡杨年轮指数和植被指数的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 85-91. [Wang Liangliang, Ye Mao, Gao Shengfeng, et al. Effects of hydrothermal factors on vegetation index and tree-ring index of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(5): 85-91.]

[14] 杨红梅, 徐海量, 樊自立, 等. 塔里木河下游表层土壤盐分空间变异和格局分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 564-570. [Yang Hongmei, Xu Hailiang, Fan Zili, et al. Spatial variability and pattern of surface soil salinity in the lower reaches of the Tarim River [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(3): 564-570.]

[15] 阿布都热合曼·哈力克. 塔里木河流域生态安全及其评价研究[J]. 水文, 2011, 31(5): 42-46. [Abdul Rahman Harik. Tarim River basin ecological security and evaluation study [J]. Hydrology, 2011, 31(5): 42-46.]

[16] 肖风劲, 欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 203-209. [Xiao Fengjin, Ouyang Hua. Ecosystem health and its evaluation indicators and methods[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(2): 203-209.]

[17] 薛英, 王让会, 张慧芝, 等. 塔里木河干流生态风险评价[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 562-567. [Xue Ying, Wang Ranghui, Zhang Huizhi, et al. Ecological risk assessment of ecosystems in the mainstream area of the Tarim River[J] . Arid Zone Research, 2008, 25(4): 562-567.]

[18] 杜巧玲, 许学工, 刘文政. 黑河中下游绿洲生态安全评价[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1916-1923. [Du Qiaoling, Xu Xuegong, Liu Wenzheng. Ecological security assessment for the oases in the middle and lower Heiher River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (9): 1916-1923.]

[19] 张文梅, 任志远, 王丽霞, 等. 城市水土资源生态安全评价——以西安市为例[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1916-1922. [Zhang Wenmei, Ren Zhiyuan, Wang Lixia, et al. Ecological security assessment of urban water and land resources: Taking Xi'an as an example[J]. Resources Science, 2008, 30(12): 1916-1922.]

[20] 李欣, 潘晓玲, 何秉宇, 等. 塔里木河干流水质评价及生态安全性研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 653-657. [Li Xin, Pan Xiaoling, He Bingyu, et al. Water quality assessment and ecological security research in main stream of the Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(5): 653-657.]

[21] 王月健, 徐海量, 杨广. 塔里木河中游地区水土资源生态安全评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(11): 111-117.

[Wang Yuejian, Xu Hailiang, Yang Guang. Ecological security assessment of land and water resources in the region of the middle reaches of the Tarim River[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33(11): 111−117.]

[22] 孙奇奇, 宋戈, 齐美玲. 基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 234−238. [Sun Qiqi, Song Ge, Qi Meiling. Analysis of land ecological safety evaluation of Harbin City based on principal component analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 234−238.]

[23] 李海萍, 高戈, 李菁. 基于GIS的盐城国家级自然保护区生态安全评价[J]. 资源与生态学报, 2020, 11(1): 38−49. [Li Haiping, Gao Ge, Li Jing. Ecological security assessment of the Yancheng National Nature Reserve based on GIS[J]. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(1): 38−49.]

[24] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤, 2003, 46(1): 2−7. [Zuo Wei, Zhou Huizhen, Wang Qiao. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety[J]. Soils, 2003, 46(1): 2−7.]

[25] 刘振举, 蔡强国, 李国强. 东北黑土区水土流失胁迫下的生态安全评价指标体系的建立[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 64−69. [Liu Zhenju, Cai Qiangguo, Li Guoqiang. Establishment of evaluation index system of ecology security under soil and water loss stress in black soil region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(6): 64−69.]

[26] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理与地理信息科学, 2002, 18(1): 67−71. [Zuo Wei, Wang Qiao, Wang Wenjie, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard[J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(1): 67−71.]

[27] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354−358. [Xiao Duning, Chen Wenbo, Guo Fuliang. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354−358.]

[28] 曹宇, 欧阳华, 肖笃宁. 额济纳天然绿洲景观健康评价[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1117−1121. [Cao Yu, Ouyang Hua, Xiao Duning. Landscape health assessment on Ejin natural oasis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(6): 1117−1121.]

[29] 王雪梅, 刘静玲, 马牧源, 等. 流域水生态风险评价及管理对策[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 237−245. [Wang Xuemei, Liu Jingling, Ma Muyuan, et al. Aquatic ecological risk assessment and management strategies in a watershed: An overview[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(2): 237−245.]

[30] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 等. 基于PSR模型的东阳江流域生态安全评价[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1702−1711. [Xie Xuefeng, Wu Tao, Xiao Cui, et al. Ecological security assessment of Dongyang river watershed using PSR modeling[J]. Resources Science, 2014, 36(8): 1702−1711.]

[31] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2418−2426. [Fu Aihong, Chen Yaning, Li Weihong. Tarim River Basin ecosystem health evaluation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2418−2426.]

[32] 李玉平, 朱琛, 张璐璇, 等. 基于改进层次分析法的水环境生态安全评价与对策——以邢台市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 117−123. [Li Yuping, Zhu Chen, Zhang Luxuan, et al. Ecological security assessment and countermeasures of water environment based on improved analytic hierarchy process: A case study of Xingtai City [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 117−123.]

[33] 罗斌, 杨雄, 何毅. 基于耦合赋权法与灰色关联法在小流域生态安全评价中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 7−12. [Luo Bin, Yang Xiong, He Yi. The application of the coupling method and grey correlation method to the ecological safety evaluation of small watershed[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(1): 7−12.]

[34] 凌红波, 徐海量, 史薇, 等. 新疆玛纳斯河流域绿洲生态安全评价[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2219−2224. [Ling Hongbo, Xu Hailiang, Shi Wei, et al. Ecological safety assessment of Manas River Basin oasis, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2219−2224.]

[35] 柯小玲, 向梦, 林芸. 基于主成分分析和灰色理论的武汉市生态安全评价研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(1): 79−85. [Ke Xiaoling, Xiang Meng, Lin Yun. Ecological security evaluation of Wuhan City based on principal component analysis and grey clustering method[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(1): 79−85.]

[36] 张鹏飞, 古丽·加帕尔, 包安明, 等. 塔里木河流域近期综合治理工程生态成效评估[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 156−164. [Zhang Pengfei, Guli Jiapaer, Bao Anming, et al. Ecological effects evaluation for short term planning of the Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 156−164.]

Evaluation of ecological water security and analysis of driving factors in the lower Tarim River, China

LI Mengyi[1,2], DENG Mingjiang[3], LING Hongbo[4], WANG Guangyan[5], XU Shengwu[5]

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin University School of Civil Engineering, Tianjin 300350, China; 3. Xinjiang Irtysh River Basin Development and Construction Management Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 5. Management Bureau of the Main Stream of Xinjiang Tarim River Basin, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Due to the continuous strengthening of the unified water resource management programs in the Tarim River Basin, the ecological water transport in its lower reaches has increased, and periodic improvements in ecological protection have been achieved. However, there is a lack of scientific evaluation regarding the impact of strict water resource management program on the water ecological security status and changes. This study used principal component analysis and comprehensive coefficient method to evaluate the water ecological security status and reveal the changing characteristics of the driving factors affecting it. The analyses were based on the 2000 to 2017 index data of water quantity, groundwater depth of the monitored section, new *Populus euphratica* biomass, vegetation coverage, and drought indices in the lower reaches of the Tarim River. The results showed that from 2000 to 2017 the comprehensive water ecological security evaluation index increased from 39.1 to 84.7, and the ecological security level continuously improved, changing the area from a "moderate warning" to a "safe" area. Hydrological and vegetative influences are the two driving factors affecting downstream water ecological security; therefore, the volume of discharge, groundwater depth, and vegetation diversity significantly impact water ecological security. This study could provide an important scientific basis for optimizing the ecological water transport model in the lower reaches of the Tarim River.

Keywords: Tarim River; downstream ecological safety assessment; principal component analysis; driving factor